

ПОВЕРКА ЭЛЕКТРОННЫХ ДАЛЬНОМЕРНЫХ ПРИБОРОВ НА БУДАПЕШТСКОМ БАЗИСЕ

САЛАДИ, К.

Лаборатория Института геодезии
Будапештского Технического Университета

Поступило: 27 ноября 1978 г.

Представлено: д-р Шаркёзи, Ф.

В последние годы электронные дальномеры получили широкое распространение, в том числе по преимуществу приборы с короткой и средней дальностью действия.

Все больше число тех предприятий и проектных бюро не-геодезического профиля, которые располагают такими приборами.

Однако, в этих приборах, по конструктивным причинам, возникают составляющие ошибок, обязательно достойные внимания; они даже могут изменяться во времени, поэтому рекомендуется их проверять не реже одного раза в полгода.

Из исследовательских и учебных задач нашего института вышло создание возможности поверки, проводимой при полевых условиях на базисе надлежащей расстановки пунктов с разными возможностями для поверки.

При выборе места базиса самым удобным для поверки являлся т. н. будапештский базис на острове Сентэндре, имеющий значительную техническую ценность.

Нами приспособился этот базис с реконструкцией оставшихся его сооружений, и построением для поверки новых отрезков, также использованием базисной сети к нему присоединенной, — к созданию комплексной проверочной сети, соответствующей для поверки любого электронного дальномера.

Этот базис готовился на острове Сентэндре к съемке города Будапешта в 1933 году. Ввиду того, что в то время Венгрия не располагала инварной проволокой, измерения проводились оборудованием, одолженным у Финляндского Института.

Двукратное компарирование четырех проволок, применяемых к измерениям, проведено *Финляндским Геодезическим Институтом* на нуммелейском базисе. Компарирования проводились перед началом и по окончании базисных измерений.

В результате измерений, проведенных с проволокой на будапештском базисе, расстояние между конечными пунктами базиса установилось в 3576, 3165 м, с относительной точностью $1/2\ 000\ 000$ [1].

Опоры в конечных пунктах базиса, также реперы, глубокозаложенные у остаточных сооружений базиса мы нашли в хорошем состоянии, несмотря на то, что минуло 45 лет с их построения.

Именно эти глубоко заложенные реперы были те, которые позволили измерение смещений точек, базиса без разборки опор в конечных пунктах базиса. В результате измерения смещений, проведенного по четкой программе, обнаружилось существование сокращения длины на 0,5 мм между конечными пунктами базиса.

К построению отрезков для поверки в качестве исхода мы располагали базисным расстоянием большой относительной точности, разделенным по следующему плану:

<i>наименование</i>	<i>расстояние в м</i>
1—2	960,06
1—3/a	1771,11
1—3/b	1773,61
1—3	1776,11
1—4	1860,11
1—5	1944,11
1—6	2028,11
1—7	2112,11
1—8	2196,11
1—9	2616,28
1—10	3576,316
	(расстояние базиса)

На опорах, помещенных вблизи опоры № 3, от нее на расстоянии 2,5 м и 5,0 м, можно прикрепить две скамьи с длиной 2500 мм, снабженной прецизионным стыкованием. На этой скамье призма дальномерных приборов имеет возможность к установке с цапфовой посадкой по расстояниям 100 мм. Скамья способствует подробной поверке фазоизмерительного устройства электрооптических дальномерных приборов. Опора № 9 построена с двойным геодезическим знаком, расстояние между которыми составляет 0,33 м. Расстановка базиса по плану стала такой, что остаточные приращения расстояний, полученные на базисе, обеспечивают следующие варианты:

при основном масштабе 5 м: 0,0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5 м
 при основном масштабе 10 м: 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 м
 при основном масштабе 20 м: 0,5; 2,5; 4,5; 6,5; 8,5; 10,5; 12,5; 14,5; 16,5;
 18,5 м.

Основной масштаб не что другое, как диапазон действия устройства для сдвига фаз, зависящего от длины волны модуляционной частоты дальномера.

Швенденер [2] предлагает два основных метода для проверки электрооптических дальномеров. К одному требуется базис, состоящий из известных расстояний. Это дает возможность самой полной проверки, так как при соответственно выбранных секциях определяется не только постоянная поправка и циклическая ошибка фазоизмерительного устройства, но и случайная погрешность ошибки частоты ошибка частоты дальномера. Другой метод предполагает существование базиса, состоящего из расстояний длинами с заранее неизвестными, но при этом определение ошибки частоты дальномера невозможно.

Совместное определение постоянной поправки и циклических ошибок фазоизмерительного устройства на базисе, состоящего из расстояний неизвестными длинами — по Рюгеру [3] — дает точное решение только итерацией в зависимости от положения фазы циклических ошибок.

Паули предлагает подобное решение проблемы [4] в статье, которое не что другое, как суммарный обзор методов для проверки дальномерных приборов с короткой дальностью действия.

В случае обоих методов Швенденер сообщает два способа:

- измерения поверяемых расстояний в отдельности, и
- измерения расстояний во всех возможных комбинациях.

Очевидно, что в последнем случае число избыточных измерений и, следовательно, точность определения значительно может повышаться.

При проверке на базисе на острове *Сент-Эндре* нам известно только расстояние между конечными пунктами базиса соответствующей точностью, а частные (промежуточные) расстояния определяются двояким образом. Один метод состоит в том, что на базисе следует производить измерения дальномерами, всеми имеющимися в нашем распоряжении, и значения частных расстояний получаются по результатам этих измерений, надлежащим подбором веса измерений, т. е. статистическим компарированием. Однако, этот метод обладает некоторой субъективностью, с одной стороны, у взвешивания результатов разнотипных дальномеров, с другой стороны по необходимому числу измерений. Сущность другого метода состоит в том, что нужно измерить расстояния таким средством, с помощью которого получается результат, на порядок точнее поверяемых приборов.

До сих пор у определения секций мы поступали по первому методу. В качестве исходного шага расстояния нами были измерены во всех возможных комбинациях лазерным дальномером AGA 6BL, характеризованным наименьшей основной ошибкой $\pm (5 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км})$. Предварительно была определена функция поправок фазовращателя.

У поверочных измерений во всех комбинациях число всех определенных расстояний составляет:

$$N = \frac{1}{2} \cdot (n + 1) \cdot n \quad (1)$$

где n — число независимых отрезков.

При первом решении задачи в обработку не привлечено условие жесткости, полученное из известного расстояния между конечными пунктами базиса. В уравнивании находились 9 неизвестных расстояний, и, как десятое неизвестное: постоянная поправка. Уравнивание — в частности — нами проведено следующим образом:

Система уравнений поправок по посредственным измерениям представится в следующем виде:

$$\begin{array}{rcl} v_{1,2} = -c + x_{1,2} & & - d'_{1,2} \\ v_{1,3} = -c & - x_{1,3} & - d'_{1,3} \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ v_{1,10} = -c & + x_{1,10} & - d'_{1,10} \\ v_{2,3} = -c - x_{1,2} + x_{1,3} & & - d'_{2,3} \\ v_{2,4} = -c - x_{1,2} & + x_{1,4} & - d'_{2,4} \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ v_{9,10} = -c & - x_{1,9} + x_{1,10} & - d'_{9,10} \end{array}$$

Здесь матрица коэффициентов:

$$\mathbf{A} ; \quad (45, 16)$$

а вектор свободных членов:

$$\mathbf{1} . \quad (45, 1)$$

Уравнивание было выполнено сперва так, что измерения расстояний учтены равновесными, а потом так, что расстояния привлечены в уравнивание по следующему отношению весов:

$$P = \frac{n}{5 + t}$$

где n — число измерений к определению расстояний;

t — расстояние в км;

5 — постоянная ошибка дальномера, независимая от расстояния.

Матрица коэффициентов нормальных уравнений имеет вид:

$$N = A \cdot P \cdot A$$

и вектор свободных членов:

$$n = (A \cdot P) \cdot l$$

тогда искомым изменениям после инвертирования матрицы N соответствует вектор:

$$x = N^{-1} \cdot n,$$

а поправкам измерений:

$$v = A \cdot x + l,$$

и наконец, уравненным результатам измерений:

$$U = L + v.$$

Задача нами решена и с учетом условия жесткости при помощи метода уменьшения числа неизвестных, приводя решение задачи к предыдущему решению. Нами рассмотрены влияния исправленных за масштаб и уравненных результатов измерений на определяемые неизвестные. Здесь масштаб вычислялся по заданной или измеренной величине расстояний.

На основе полученных результатов нами установлено, что постоянная величина прибора: — 0,152 м, заданная заводом-изготовителем хорошо совпадает с величиной: — 0,1518, полученной из уравновешивания. Учет весов определенных расстояний дало изменение максимально 1 мм, вследствие которого более короткие расстояния сократились, а более длинные получили удлинение. Привлечение условия жесткости и уравновешивание результатов, исправленных за масштаб дали результаты, совпадающие в пределах 0,0—1,0 мм.

Полученные данные приведены в таблице:

Расстояния	I	II	III	IV
1— 2	960,064	,064	,067	,067
1— 3	1776,114	,113	,118	,119
1— 4	1860,110	,109	,115	,115
1— 5	1944,109	,108	,114	,114
1— 6	2028,110	,111	,116	,116
1— 7	2112,115	,115	,121	,121
1— 8	2196,116	,116	,122	,121
1— 9	2616,278	,279	,286	,286
1—10	3576,306	,307	,316	—

- В таблице: I — уравненные расстояния, равновесные;
 II — уравненные расстояния, с весами, зависящими от расстояний;
 III — уравненные расстояния с весами, зависящими от расстояний, исправленные за масштаб;
 IV — уравненные условием жесткости расстояния, с весами, зависящими от расстояний.

Остальные дальномеры (AGA 12, ЕОК 2000, D1-3) привлеченные в измерения, не позволили — по дальности их действия — проводить испытания во всех комбинациях вдоль полного базиса, таким образом для их рассмотрения использованы только опоры между пунктами № 3 и № 9, и по преимуществу мы хотели определить постоянную поправку, а также самые вероятные значения расстояний. (Каждый раз предварительно проводили поверку фазоизмерительного устройства). Для осуществления программы измерений нужно выполнить 21 измерение расстояний по формуле (I). Уравновешивание выполнили по вышеописанному способу, при этом веса результатов измерений приняты за равные на более коротких дистанциях.

Полученные результаты по разным типам приборов:

Расстоя- ния	AGA-12	ЕОК-2000	AGA 6BL	D1-3
3-4	84,001	84,002	83,995	83,994
3-5	168,000	168,005	167,994	167,992
3-6	252,003	252,010	251,995	251,991
3-7	336,002	336,013	336,000	335,989
3-8	420,004	420,013	420,001	419,987
3-9	840,174	840,190	840,165	840,142

Расстоя- ния	I	II			
		AGA-12	ЕОК-2000	AGA 6BL	D1-3
3-4	83,999	+2	+3	-4	-5
3-5	167,998	+2	+7	-4	-6
3-6	252,000	-3	+10	-5	-9
3-7	336,002	0	+11	-2	-13
3-8	420,003	-1	+10	-2	-16
3-9	840,172	-2	+18	-7	-30

- В таблице: I — расстояния, полученные статистическим компарированием;
 II — отклонения расстояний от расстояний, приведенных из статистического компарирования по типам дальномеров.

Полученные значения постоянной поправки приборов и их ср. кв. ошибка:

AGA 12	-0,031 м	±0,4 мм
ЕОК-2000	-0,150 м	±1,9 мм
AGA 6BL	-0,152 м	±1,8 мм
DI-3	-0,003 м	±1,4 мм

Выполненные до сих пор опытные измерения еще не позволили сделать выводы из полученных результатов. Однако, можно установить, что отклонения уравненных расстояний, измеренных разными дальномерами покажут определенную тенденцию. Особенно хорошо видна эта тенденция в случае прибора DI-3, при котором предполагается, что имеется частотная погрешность. При дальнейших испытаниях нам хотелось бы доказать с одной стороны, репродуктивность измерений, а с другой стороны, решение по полевой поверке фазонизмерительного устройства.

В ближайшем будущем будем иметь возможность для определения самых вероятных расстояний между опорами базиса при помощи прецизионного электрооптического дальномера *Мекометра* ME-3000, вследствие которого поверка станет более простой и надежной.

При обработке результатов измерений для определения постоянной поправки и самых вероятных расстояний кроме строгого уравнивания, мы использовали и метод Хальмша—Кадара [5], [6]. С помощью метода на программируемой карманной вычислительной машине (HP 67) за несколько секунд получается результат, отклоняющийся от результата строгого уравнивания в пренебрежимо малой мере.

Сущность метода состоит в том, что при измерениях во всех комбинациях для неизвестных можно описать в общем следующие соотношения:

$$x_{1j} = \frac{1}{n+1} \left\{ 2(j-1)c + 2d'_{1j} + [d']_{1j} \right\} \quad (2)$$

где $[d']_{1j}$ — сумма приведенных $(n-2)$ расстояний.

В нашем случае для секции между опорами № 3—№ 9 базиса необходимое число N измерений по формуле (1) равно: $N = 21$.

Для определяемых расстояний по формуле (2) можно написать:

$$x_{12} = \frac{1}{7} [2c + 2d'_{1,2} - (d'_{1,3} + d'_{3,2}) - (d'_{1,4} + d'_{4,2}) + \\ + (d'_{1,5} + d'_{5,2}) + (d'_{1,6} + d'_{6,2}) + (d'_{1,7} + d'_{7,2})]$$

$$\begin{aligned}
 x_{13} &= \frac{1}{7} [4c + 2d'_{1,3} + (d'_{1,2} + d'_{2,3}) + (d'_{1,4} + d'_{4,3}) + \\
 &\quad + (d'_{1,5} + d'_{5,3}) + (d'_{1,6} + d'_{6,3}) + (d'_{1,7} + d'_{7,3})] \\
 &\quad \cdot \\
 &\quad \cdot \\
 &\quad \cdot \\
 &\quad \cdot \\
 x_{17} &= \frac{1}{7} [12c + 2d'_{1,7} + (d'_{1,2} + d'_{2,7}) + (d'_{1,3} + d'_{3,7}) + \\
 &\quad + (d'_{1,4} + d'_{4,7}) + (d'_{1,5} + d'_{5,7}) + (d'_{1,6} + d'_{6,7})]
 \end{aligned}$$

где $d'_{1j} = -d'_{j1}$.

Значение постоянной поправки получается в общем следующим образом:

$$c = - \frac{1}{\sum_{k=1}^{n-3} [n - (2k - 1)]^2} [(n-1)\Delta_1 + (n-3)\Delta_2 + (n-5)\Delta_3 + \dots]. \quad (3)$$

Здесь коэффициенты $(n-1)$; $(n-3)$; $(n-5)$ по смыслу задачи могут быть только положительными.

Образование составляющих постоянного слагаемого Δ_1 ; Δ_2 ; Δ_3 ; ... можно проводить просто, по наглядности:

$$\begin{aligned}
 \Delta_1 &= d'_{1,2} + d'_{2,3} + d'_{3,4} + d'_{4,5} + d'_{5,6} + d'_{6,7} + d'_{7,1} \\
 \Delta_2 &= d'_{1,3} + d'_{2,4} + d'_{3,5} + d'_{4,6} + d'_{5,7} + d'_{6,1} + d'_{7,2} \\
 \Delta_3 &= d'_{1,4} + d'_{2,5} + d'_{3,6} + d'_{4,7} + d'_{5,1} + d'_{6,2} + d'_{7,3}
 \end{aligned}$$

На основе формулы (3) постоянная поправка имеет вид:

$$c = - \frac{1}{35} (5\Delta_1 + 3\Delta_2 + \Delta_3).$$

Результаты, полученные при решении задачи из измерений, проведенных отдельными разнотипными приборами, совпадали с результатами сторогого уравновешивания с точностью в 1 мм.

Опыт свидетельствует о том, что наш базис — с построенными для поверки новыми отрезками — имеет большую приспособленность к быстрой и точной поверке электрооптических дальномеров. Надежные значения расстояний между опорами отрезков будут упрощать работы поверки и обеспечивать основу для комплексного исследования приборов. Мы накопили опыт и в области обработки результатов. Кроме опытных измерений, выполняемых на

поверочных отрезках, к задачам ближайшего будущего относится и обновление базисной сети, при помощи которой можно создать единую поверочную сеть для поверки дальномера любого типа.

Резюме

Применение широко распространенных электронных дальномеров в технических условиях, требует знать значения параметров с надлежащей надежностью. Это особенно важно тогда, если при измерениях стремимся к крайней точности, или требуется повторное определение параметров прибора в случае ремонта.

С технических и экономических точек зрения не целесообразно, если институты или предприятия отдельно решают поверку своих дальномеров. Исходя из таких соображений, мы начали обновление будапештского базиса, приспособленного к поверке электронных дальномерных приборов. Нами продолжаются испытания в области обработки результатов измерений поверки, с одной стороны, для дальнейшего упрощения оценки поверок, а с другой стороны, для того, чтобы число измеренных величин было наименьшим при заданной требуемой точности.

Список литературы

1. Ольтан, К.: Измерение инварной проволокой в Будапеште.* 1951.
2. SCHWENDENER, H. R.: Elektronische Distanzmesser für kurze Strecken. Zeitschrift für Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik, 3/1971.
3. RÜEGER, J. M.: Probleme bei der gemeinsamen Bestimmung von zyklischen Fehlern und Additionskonstante bei elektrooptischen Distanzmessern. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 10/1976.
4. PAULI, W.: Über Eichung und Eichstrecken elektrooptischer Entfernungsmeßgeräte. Vermessungstechnik, 8/1977.
5. Хальмош, Ф.—Кадар, И.: Определение слагающей постоянной электронных дальномеров.* Геодезия еш картография, 1972/2.
6. Хальмош, Ф.—Кадар, И.: Дальнейшие рассмотрения к эффективному применению дальномеров с короткой дальностью действия.* Геодезия еш Картография, 1977/2.

Кароль САЛАДИ, инженер, Н-1521 Будапешт

* На венгерском языке